

**Exp. 2 – Seletor**  
**Parte 3 – Mapeamento do**  
**campo magnético**  
**Aula 9 - 2009**

**Prof. Henrique Barbosa**  
**Edifício Basílio Jafet - Sala 100**  
**Tel. 3091-6647**  
**[hbarbosa@if.usp.br](mailto:hbarbosa@if.usp.br)**

**<http://www.fap.if.usp.br/~hbarbosa>**

# ESTA AULA

- Discussão das sínteses:
  - Movimento da partícula no campo elétrico
  - Estimando o tamanho do capacitor ideal
- Mapeamento do campo magnético
  - Funcionamento do sensor de campo magnético (efeito Hall)
- Estatística: teste de hipótese, t-student, gaussiana, etc...

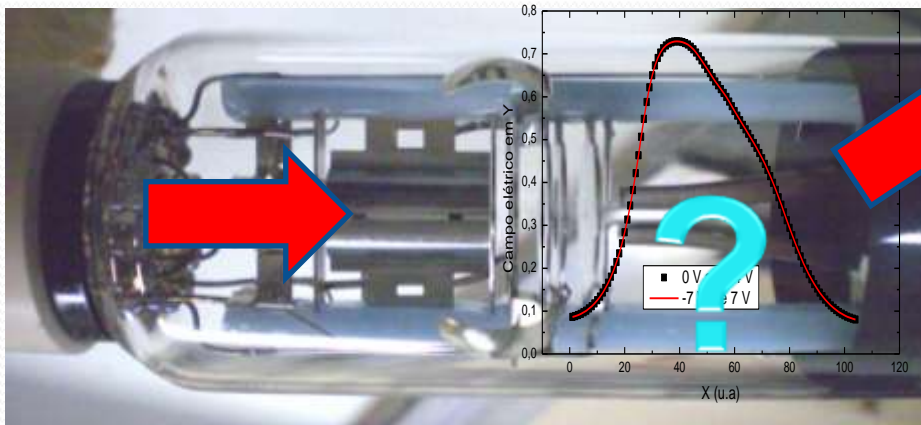
# Exp. 2 – Seletor de Velocidades

## PROGRAMAÇÃO

- Semana 1
  - Mapear o campo elétrico das placas defletoras
- Semana 2
  - Simular o campo elétrico das placas defletoras
- Semana 3
  - Estudar a deflexão do feixe em função da tensão entre as placas e da tensão de aceleração
- Semana 4
  - Mapear e simular o campo magnético das bobinas
- Semana 5
  - Estudar a deflexão do feixe em função da corrente nas bobinas e da tensão de aceleração
- Semana 6
  - Calibrar e obter a resolução do seletor de velocidades

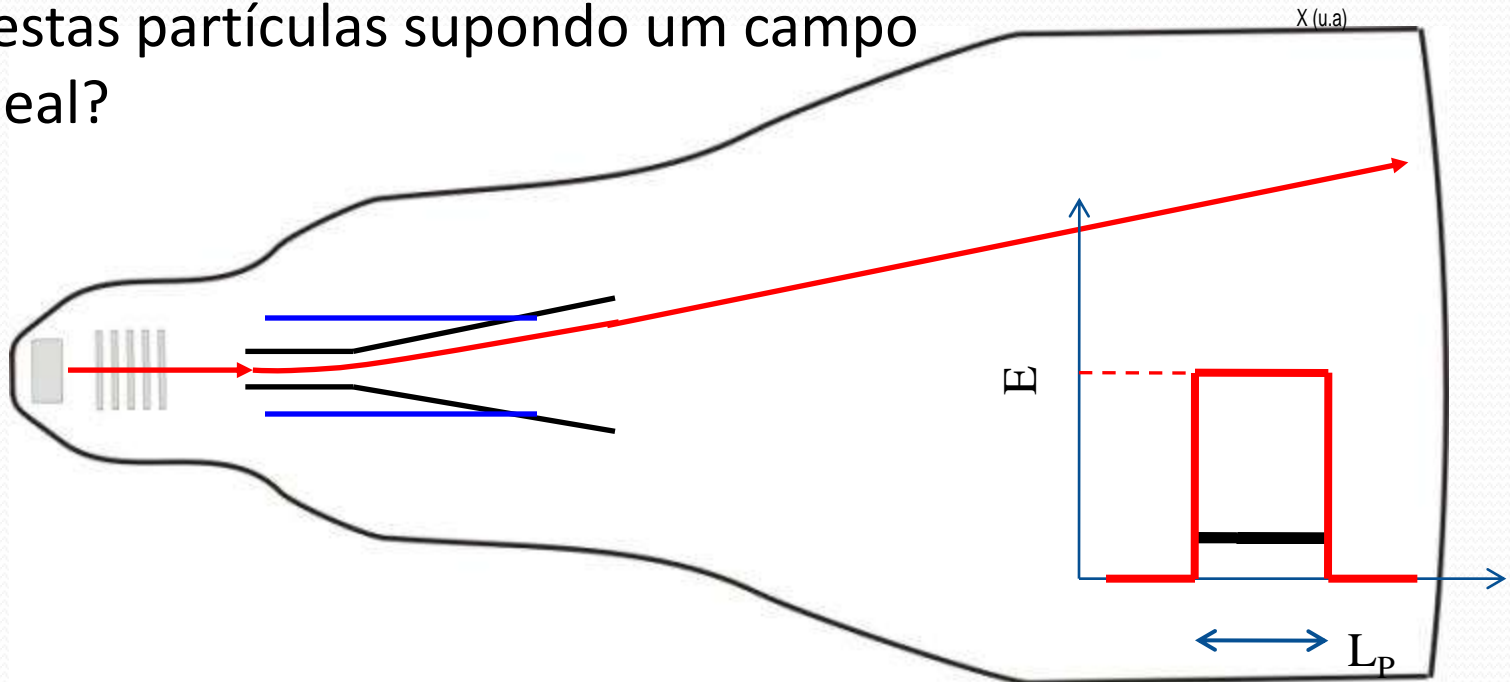
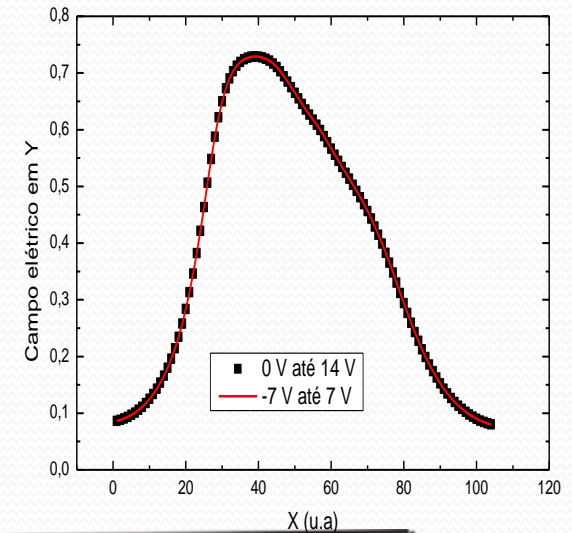
# Atividades da semana passada

- Nós conseguimos entender o campo entre as placas?
  - Simulações para resolver a equação de Laplace para o sistema estudado.
- Colocando um elétron neste campo, nós conseguimos entender o movimento, dado a tensão de aceleração e a tensão entre as placas?



# Movimento em campo elétrico

- Problema real
  - Efeitos de borda, campo não uniforme
- Tentativa teórica
  - Solução do problema ideal
  - Podemos descrever o movimento destas partículas supondo um campo ideal?



# Movimento em um campo uniforme

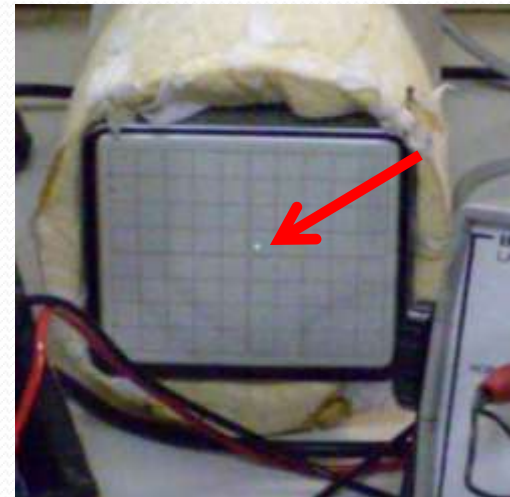
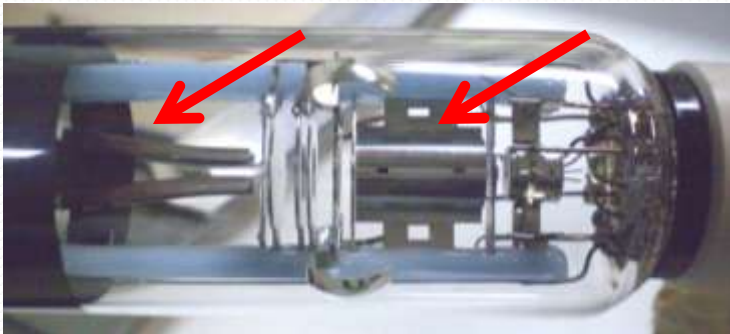
- Em uma situação com um sistema ideal, temos:

$$h = A' \frac{V_P}{V_{AC}}$$

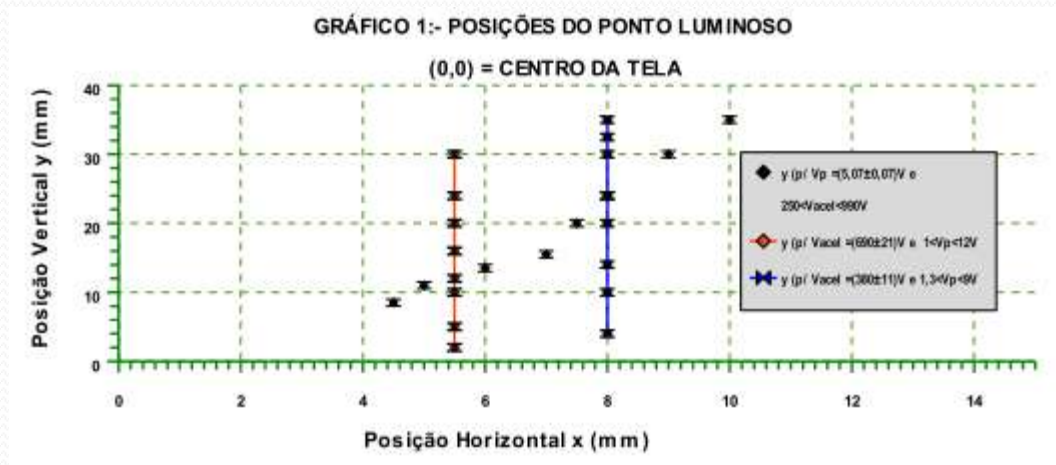
- O deslocamento é proporcional à tensão entre as placas e inversamente proporcional à tensão de aceleração dos elétrons
- Será que esta hipótese é verdadeira? Será que podemos **simplificar** o problema de campo não uniforme para um problema ideal?

# Atividades da Semana (parte 1)

- Estudar como a deflexão ( $H$ , deslocamento do feixe) depende da tensão entre as placas ( $V_P$ ) e da tensão de aceleração ( $V_{AC}$ )
  - Fazer gráfico de  $H$  em função de  $V_P$  para  $V_{AC}$  fixo
  - Fazer gráfico de  $H$  em função de  $V_{AC}$  para  $V_P$  fixo
  - Tomar cuidado de escolher a variável fixa de modo a poder **aproveitar toda a tela do osciloscópio**

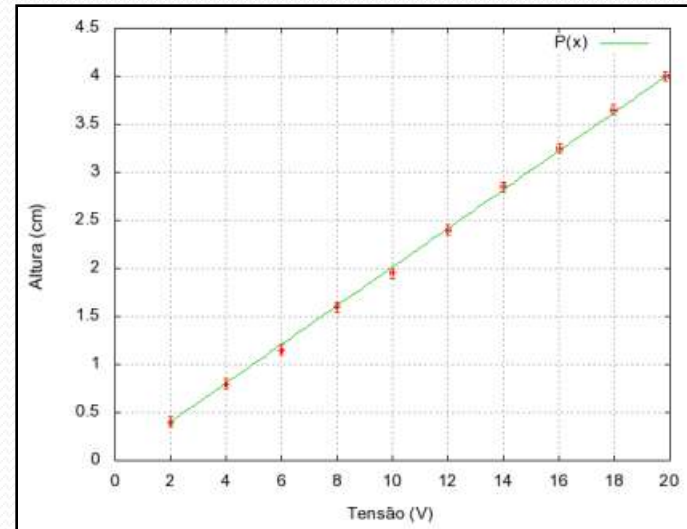
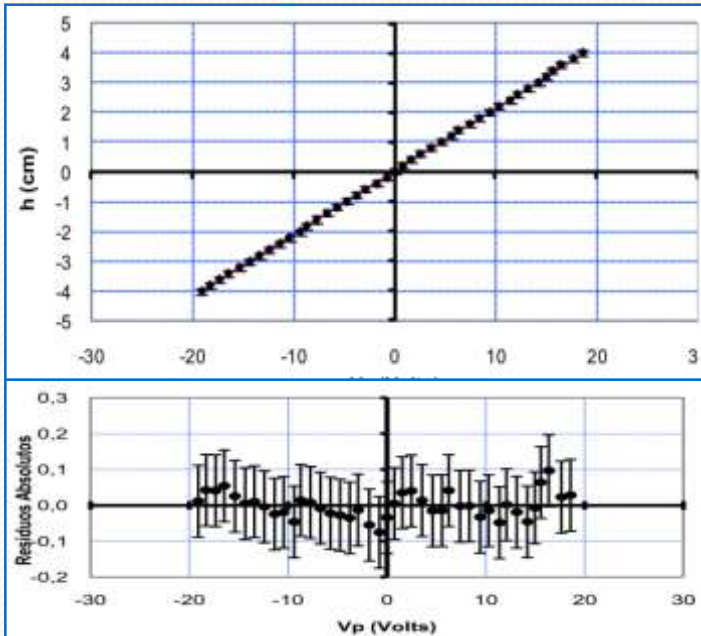
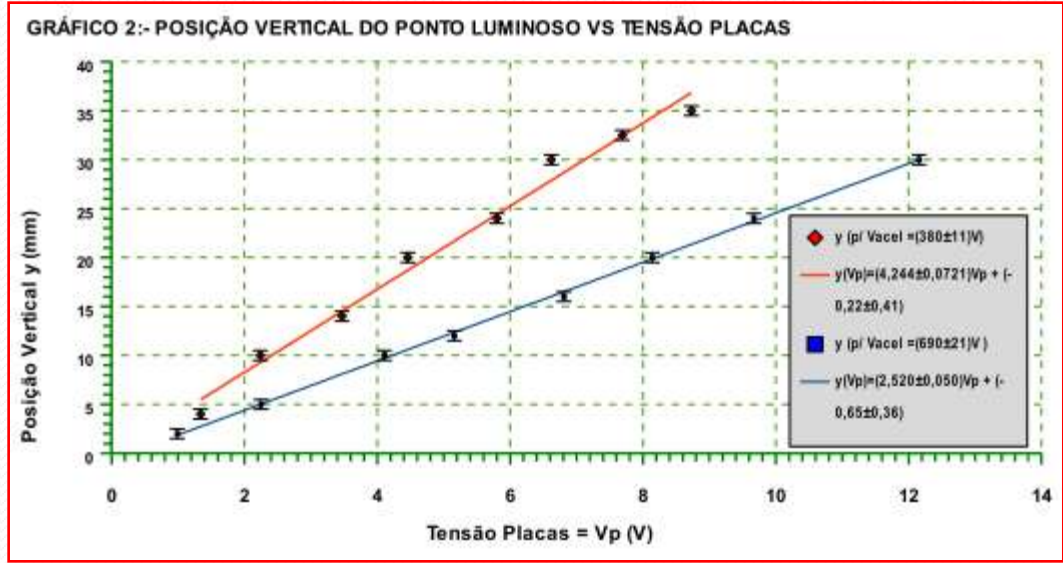
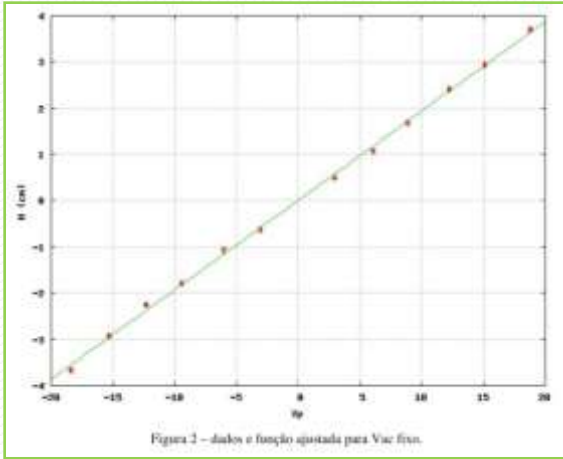


# Deslocamento na Tela do TRC

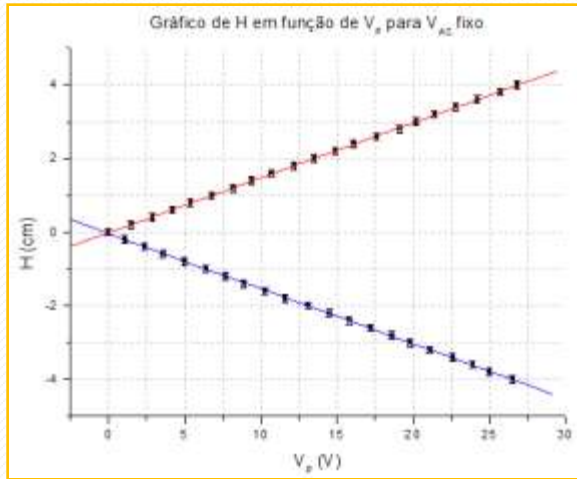




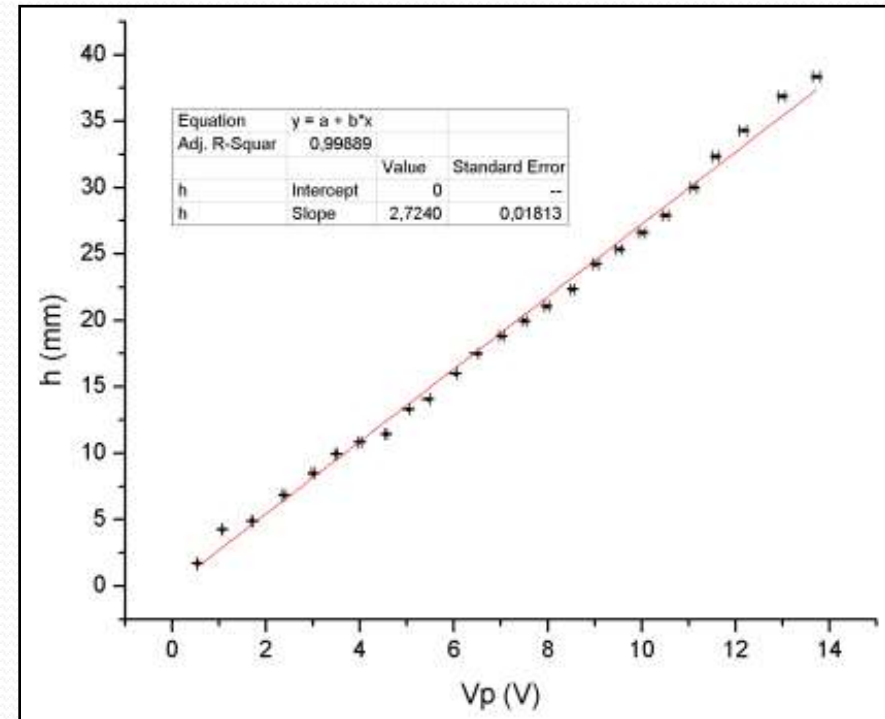
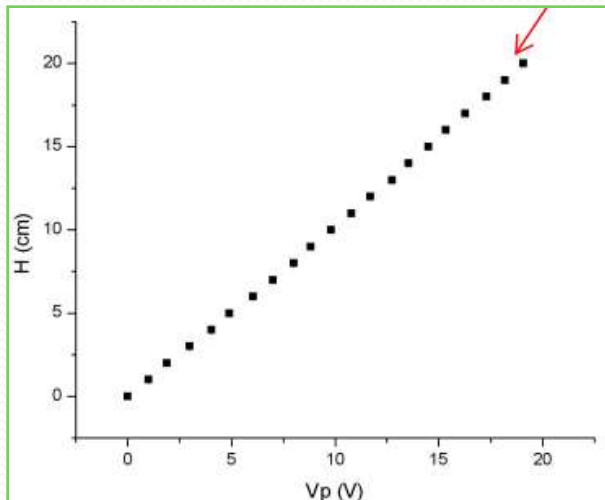
# Vac Fixo



# Vac Fixo (alguns problemas)



Sinal de  $V_p$



Tendência não analisada

Faltando as incertezas...

# Vp fixo

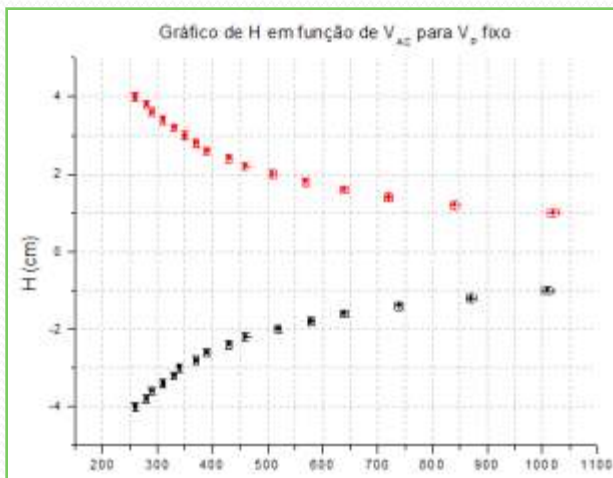
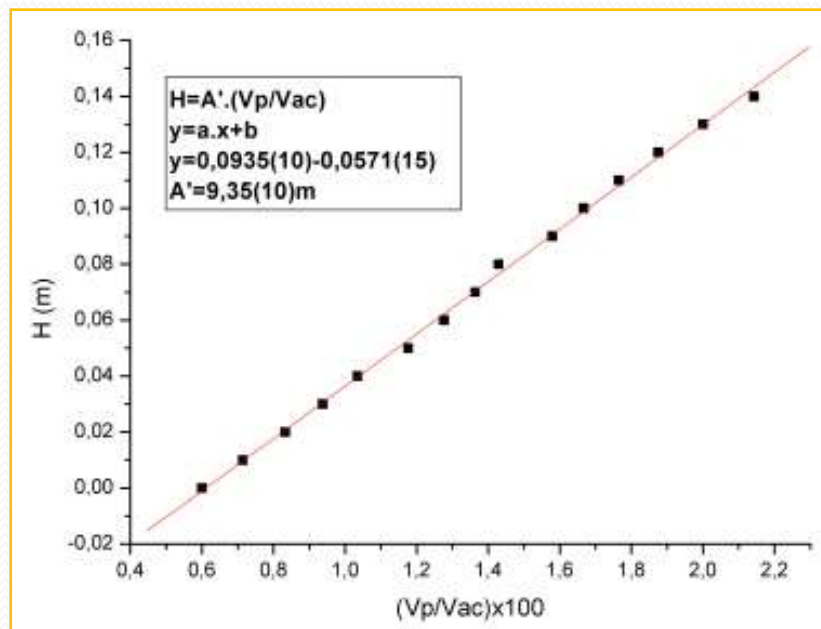
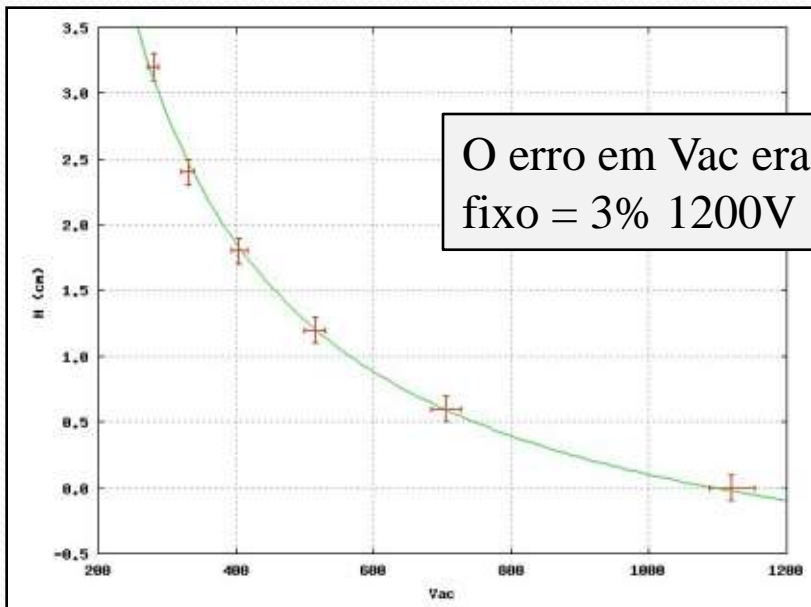
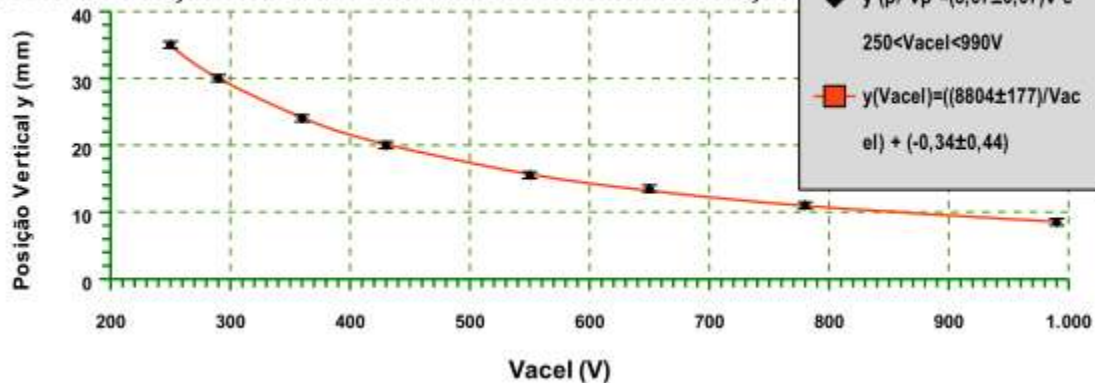


GRÁFICO 3:- Posição Vertical do Ponto Luminoso vs Tensão Aceleração



Outra maneira de analisar, linearizando.

# Atividades da Semana (parte 2)

- O nosso modelo ideal é compatível com os dados? Discuta
  - Se for compatível obtenha, experimentalmente, o valor da constante  $A'$ .
  - Nesse modelo o tamanho das placas e a distância entre elas são parâmetros geométricos. Obtenha os valores experimentais para essas grandezas. Discuta eventuais ambigüidades e como você as tratou.
- Em baixas tensões de aceleração ( $V_{AC} \sim 450V$ ) e grandes deslocamentos ( $H \sim 4 \text{ cm}$ ) nota-se que o feixe do TRC se divide em 2. Tente observar esse efeito e, se possível, medi-lo.
  - Discuta as possíveis origens desse efeito. Se possível quantifique o fenômeno.

# Quem é a constante $A'$ ?

- Sabemos que

$$h = \frac{qEL_P}{mv_{0x}^2} \left( \frac{L_P}{2} + D_{PS} \right) = A \frac{E}{v_{0x}^2}$$

- Mas também sabemos que (ver aula passada)
  - $E = V_P/d$
  - $mv_{0x}^2/2 = qV_{AC}$
- Podemos então escrever que

$$h = \frac{L_P V_P}{2dV_{AC}} \left( \frac{L_P}{2} + D_{PS} \right) = A' \frac{V_P}{V_{AC}}$$

# Quem é a constante A'?

- Ou seja

$$A' = \frac{L_P}{2d} \left( \frac{L_P}{2} + D_{PS} \right)$$

- Experimentalmente, medimos o valor da constante A'.
- Ela não depende do tipo de partícula que passa pelo TRC. Depende apenas de como ele foi construído!

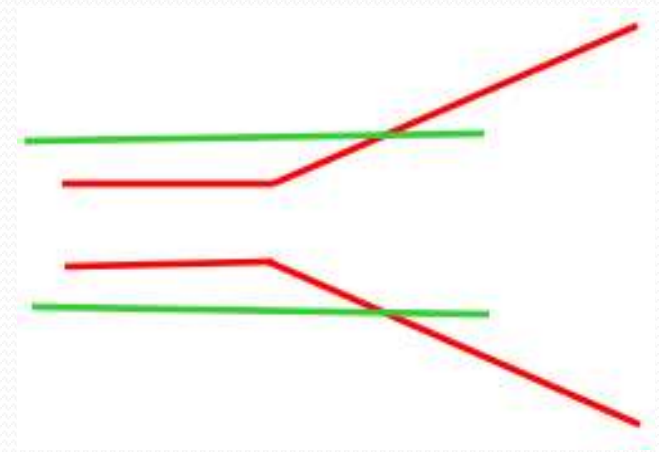
| A' (cm)               |                       |
|-----------------------|-----------------------|
| Vp=cte                | Vac=cte               |
| 166.5 (20)            | 167.2 (35)            |
| 173.7 (43)            | 173.9 (35) 161.3 (56) |
| 192.5 (60)            | 170 (5)               |
| <b>180.39 (548)</b>   | <b>169.8 (34)</b>     |
| 214.5 (50) 192.5 (71) | 174.1 (55)            |
| 165.0 (28)            | 178.06 (73)           |
| <b>838 (40)</b>       | <b>935 (10)</b>       |
| --                    | --                    |
| 166.2(17)             | 171.2 (40)            |
| --                    | 175.8 (23)            |

**176 ± 5(prop) ± 13(méd) cm**

# Quem era a constante $A'$ ?

- Ou seja

$$A' = \frac{L_P}{2d} \left( \frac{L_P}{2} + D_{PS} \right)$$



- Contudo, quais são as dimensões das placas equivalentes ( $L_p$ ) e a distância ( $d$ ) entre elas?
- Temos duas variáveis e apenas uma medida. Como resolver esta ambigüidade?

# Quem é $L_p$ e $d$ ?

- Vamos lembrar alguns conceitos sobre movimento, em especial impulso de uma força

$$\vec{I} = \Delta\vec{p} = \int_0^t \vec{F}(t) dt$$

- No nosso caso ideal, a força é constante com módulo dado por  $qE$ . Nesta situação:

$$\vec{I} = \int_0^t \vec{F}(t) dt = \int_0^t q\vec{E} dt = q\vec{E}t = q\vec{E} \frac{L_P}{v_{0x}}$$



# Quem é $L_p$ e $d$ ?

- Lembrando que o deslocamento na tela do TRC vale:

$$h = \frac{qEL_P}{mv_{0x}^2} \left( \frac{L_P}{2} + D_{PS} \right)$$

- E sabendo que o impulso, na direção  $y$ , tem módulo  $I=qEL_P/v_{0x}$ , e sabendo que o momento inicial da partícula vale  $p = mv_{0x}$ , temos:

$$h = \frac{I}{p} \left( \frac{L_P}{2} + D_{PS} \right) = Cte \frac{\Delta p}{p}$$

# Quem é $L_p$ e $d$ ?

- Ou seja, o deslocamento está diretamente relacionado ao impulso fornecido pelo campo elétrico

$$h = Cte \frac{\Delta p}{p}$$

- Podemos utilizar esta informação para fazer uma boa escolha para o comprimento efetivo das placas.
  - Onde se dá o impulso que altera o deslocamento da partícula?

# Quem é $L_p$ e $d$ ?

- No caso ideal temos que:

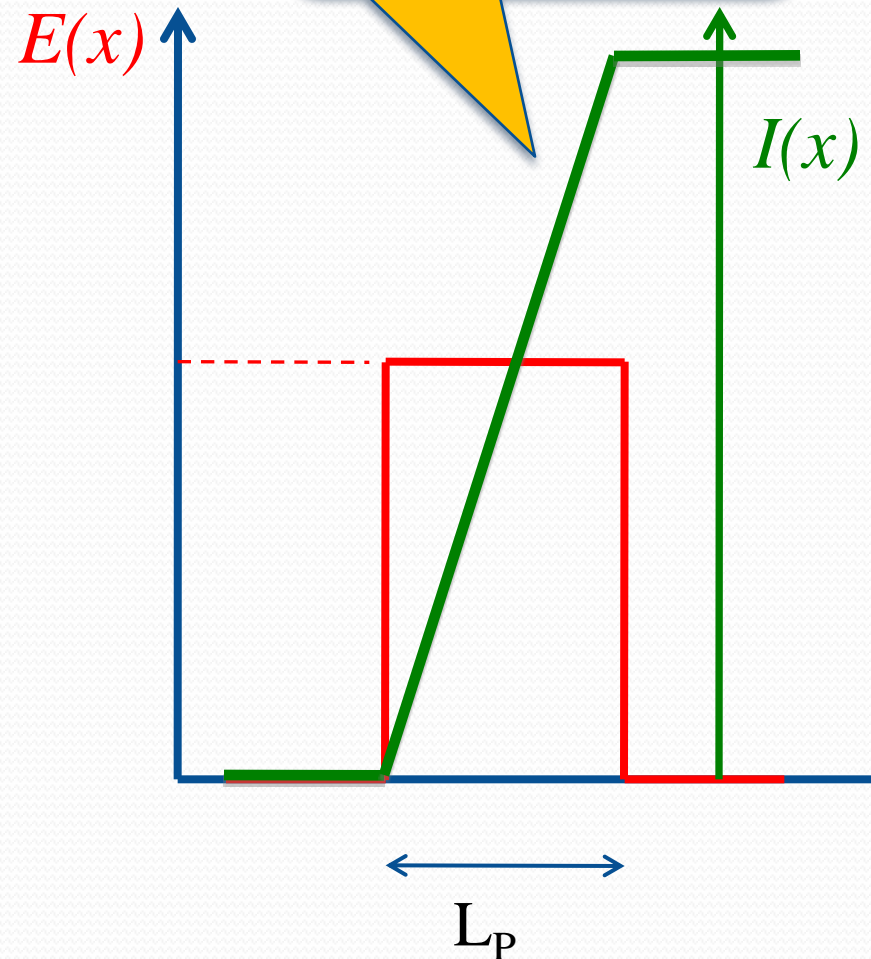
$$\vec{I} = q\vec{E}t$$

- $v_{0x}$  é constante, por isso:

$$v_{0x} = \frac{x}{t} \Rightarrow t = \frac{x}{v_{0x}}$$

- Temos:

$$\vec{I} = \frac{q\vec{E}}{v_{0x}} x$$



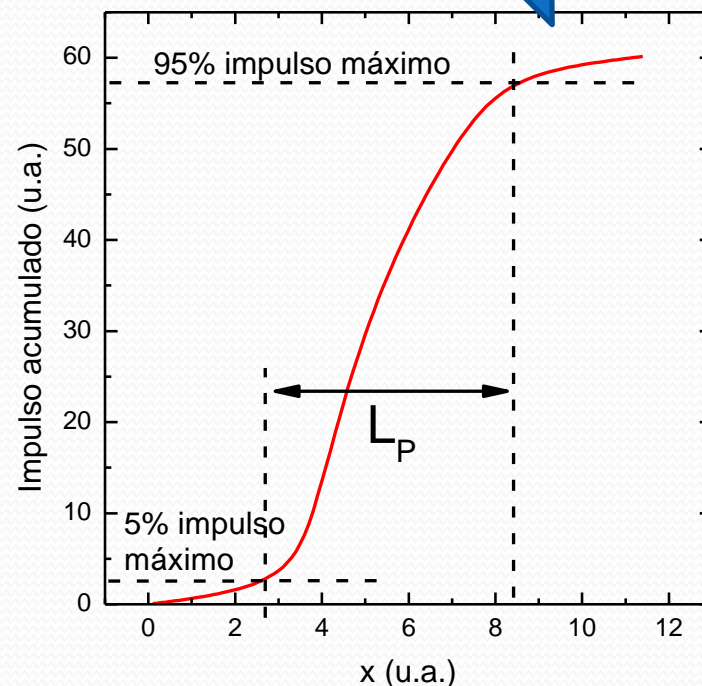
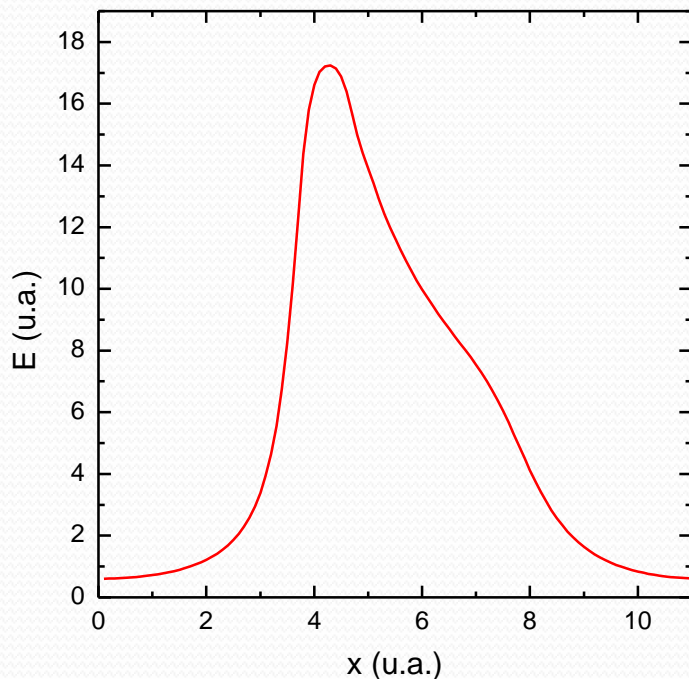
# Quem é $L_p$ e $d$ ?

- Calculando o impulso acumulado

$$\vec{I}(x) = \int_0^t \vec{F}(t) dt = \int_0^x \frac{q\vec{E}}{v_{0x}} dx$$

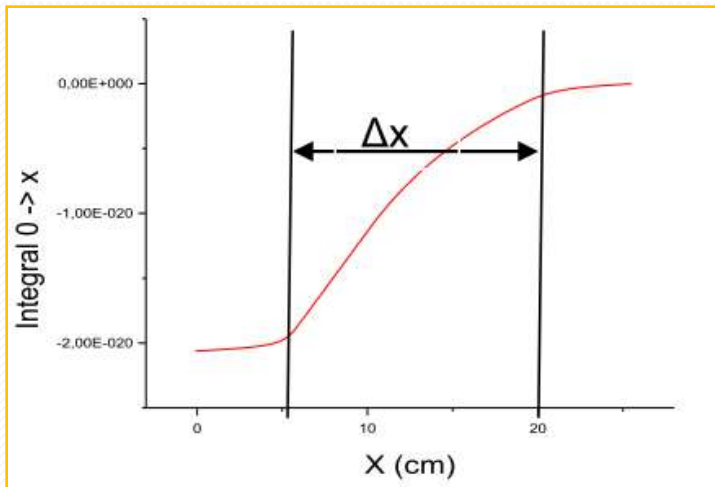
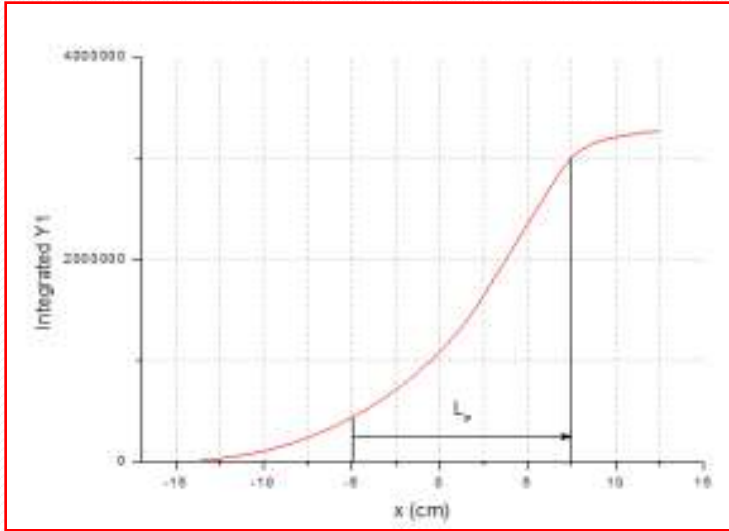
Usar o campo simulado

Calcular  $L_p$  a partir deste gráfico



IMPORTANT!

# Alguns grupo já fizeram isso!!!

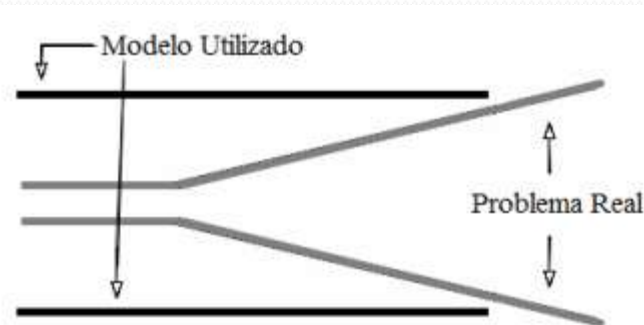


| $L_p$ (mm) | $d$ (mm)            |
|------------|---------------------|
| 25.2 (15)  | 1.81 (26)           |
| 28.6 (3)   | 2.02 (8) 1.784 (56) |
|            |                     |
|            |                     |
|            |                     |
|            |                     |
|            |                     |
|            |                     |
|            |                     |
| 24.68 (??) | 1.7 (??)            |

# Atividades da semana (1)

- Da simulação do campo, fazer o gráfico de impulso acumulado em função do comprimento.
  - Determinar o comprimento efetivo das placas (LP)
    - Usar como limites 5% e 95% do impulso máximo acumulado como limites
    - Dica: use o Excel e faça a integral como a soma de pequenos retângulos
- Determinar a distância efetiva ( $d$ ) entre as placas e a distância da  $D_{PS}$  a partir dos resultados acima.
- Comparar o comprimento e distância com os valores geométricos do TRC (ver no site)

Atenção: onde o capacitor ideal esta localizado? Alinhado pela esquerda ou pela direita? Isso faz diferença? Como resolver?



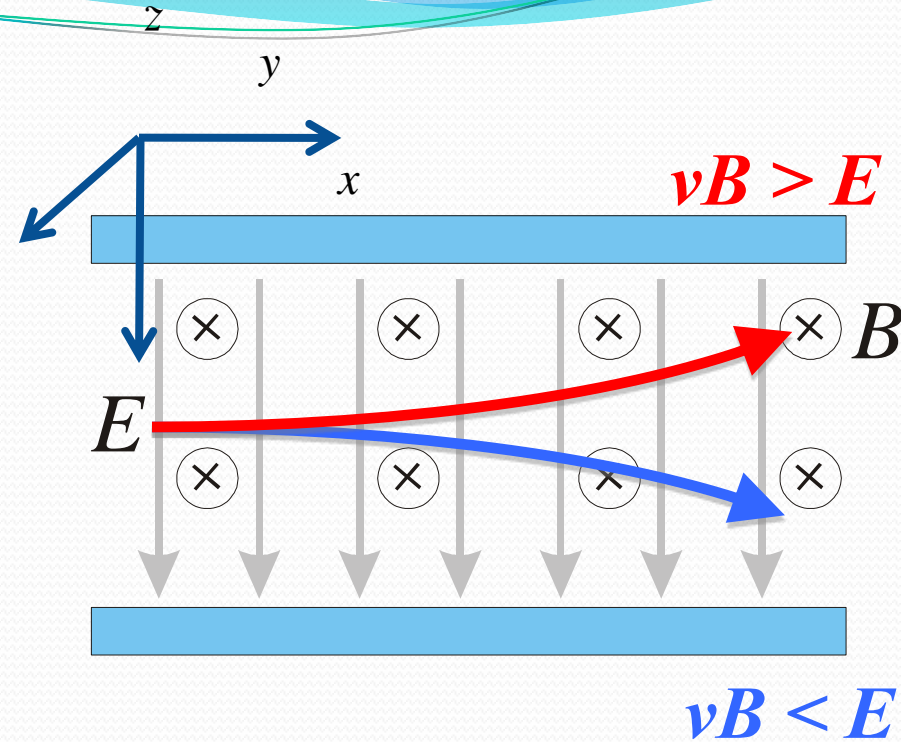
# Exp. 2 – Seletor de Velocidades

## PROGRAMAÇÃO

- Semana 1
  - Mapear o campo elétrico das placas defletoras
- Semana 2
  - Simular o campo elétrico das placas defletoras
- Semana 3
  - Estudar a deflexão do feixe em função da tensão entre as placas e da tensão de aceleração
- Semana 4
  - Mapear e simular o campo magnético das bobinas
- Semana 5
  - Estudar a deflexão do feixe em função da corrente nas bobinas e da tensão de aceleração
- Semana 6
  - Calibrar e obter a resolução do seletor de velocidades

# Objeto de estudo

- O filtro de Wien consiste de uma configuração de campo elétrico e magnético cruzados (perpendiculares) e perpendiculares à velocidade inicial da partícula incidente



$$\vec{v}_0 = v_0 \hat{i}$$

$$\vec{B} = -B \hat{j}$$

$$\vec{E} = E \hat{k}$$

$$m \frac{d}{dt} \vec{v} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

$$m \frac{d}{dt} \vec{v} = q(E - vB) \hat{k}$$

Aceleração apenas na direção  $k$ .  
Sentido depende das intensidades de  $E$ ,  $v$  e  $B$



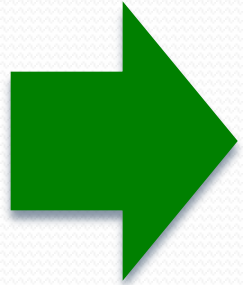
# Metodologia a ser adotada

- Isolar o campo elétrico
  - Como gerar o campo elétrico
  - Estudar o campo elétrico gerado
  - Do que depende o campo? Qual a intensidade em cada ponto do espaço e como a geometria do problema altera este campo?
- Entender como é o movimento de partículas dentro deste campo elétrico?
  - Como gerar estas partículas?
  - Podemos descrever o movimento destas partículas teoricamente? Quais os compromissos adotados e as limitações teóricas e experimentais?



# Metodologia a ser adotada

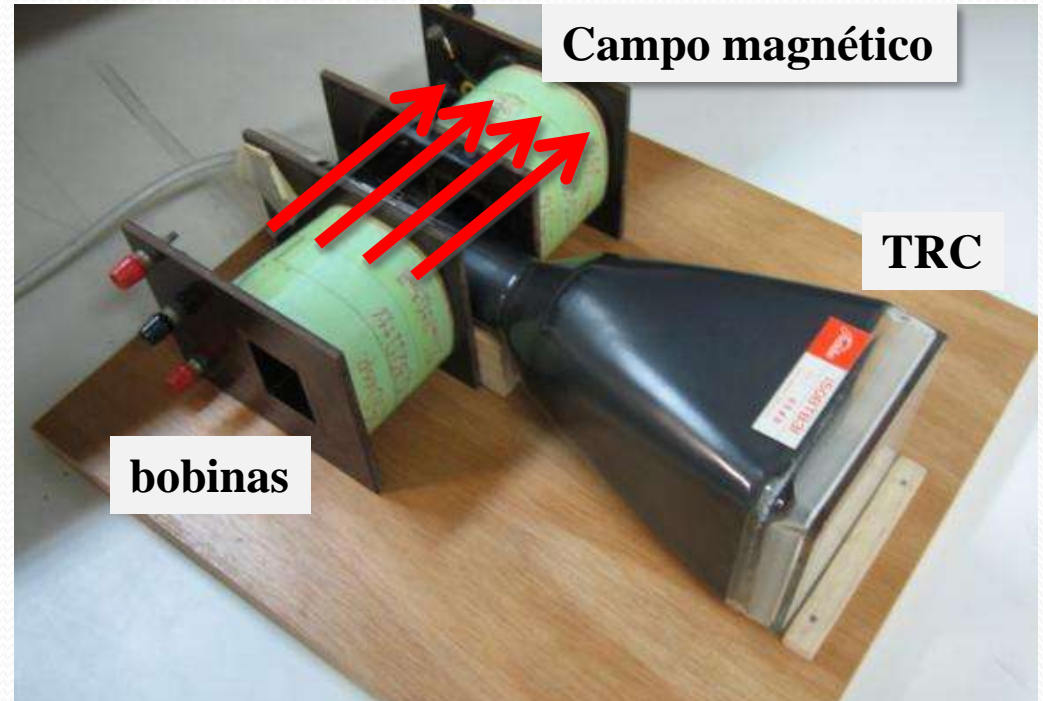
- Isolar o campo magnético
  - Como gerar o campo magnético?
  - Como estudar este campo? Como medi-lo?
  - Do que depende este campo? Podemos entendê-lo teoricamente?
- Como é o movimento destas partículas dentro deste campo magnético?
  - Podemos descrever este movimento teoricamente? Como fazer um experimento para testar as hipóteses teóricas?
  - Quais as limitações e aproximações adotadas



# Nosso acelerador de partículas

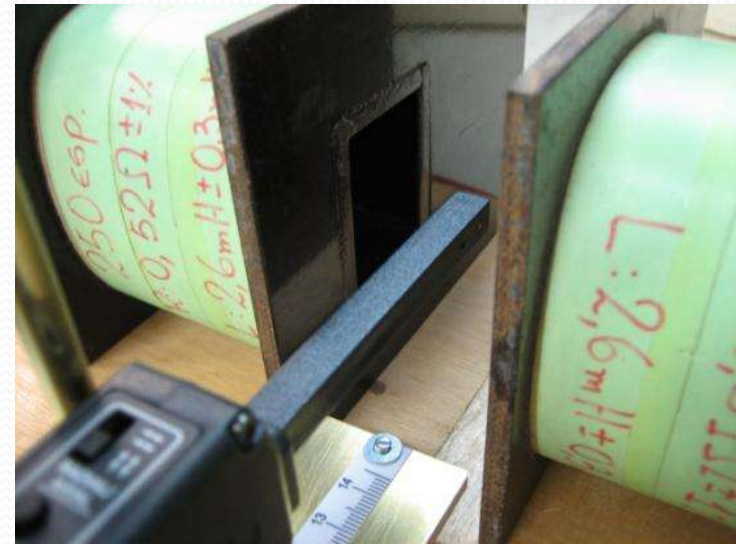
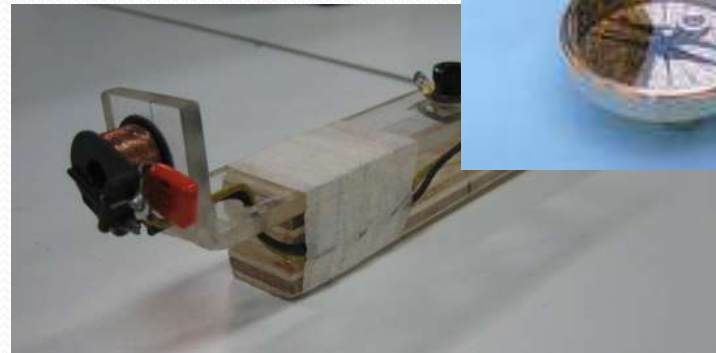
- TRC
  - Produz feixe de elétrons acelerados e propicia campo elétrico
  - Tela é o detector de partículas
- Bobinas
  - Campo magnético

Como medir o campo magnético ??



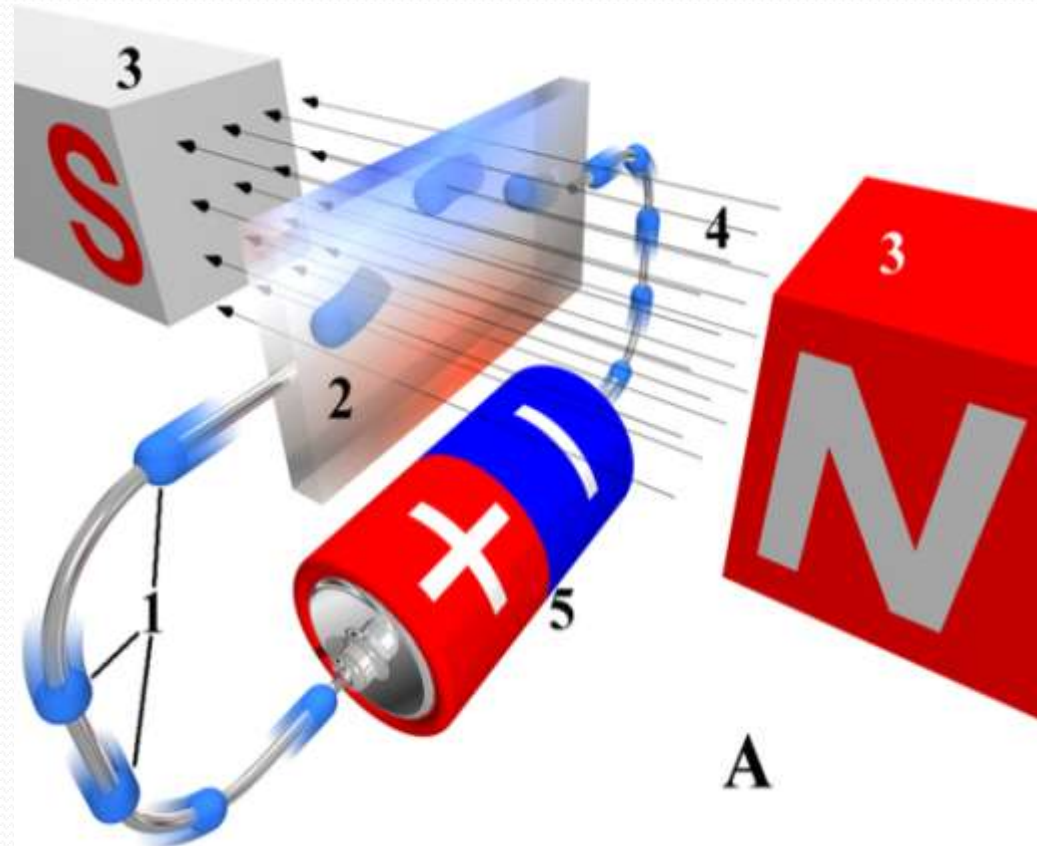
# Como medir campos magnéticos?

- Muitas técnicas
  - Bússola
    - somente direção do campo
  - Bobinas sondas
    - Campos com fluxo variável
  - Medidor por efeito Hall
    - campos estáticos diversos
  - TRC
    - Movimento de elétrons no campo



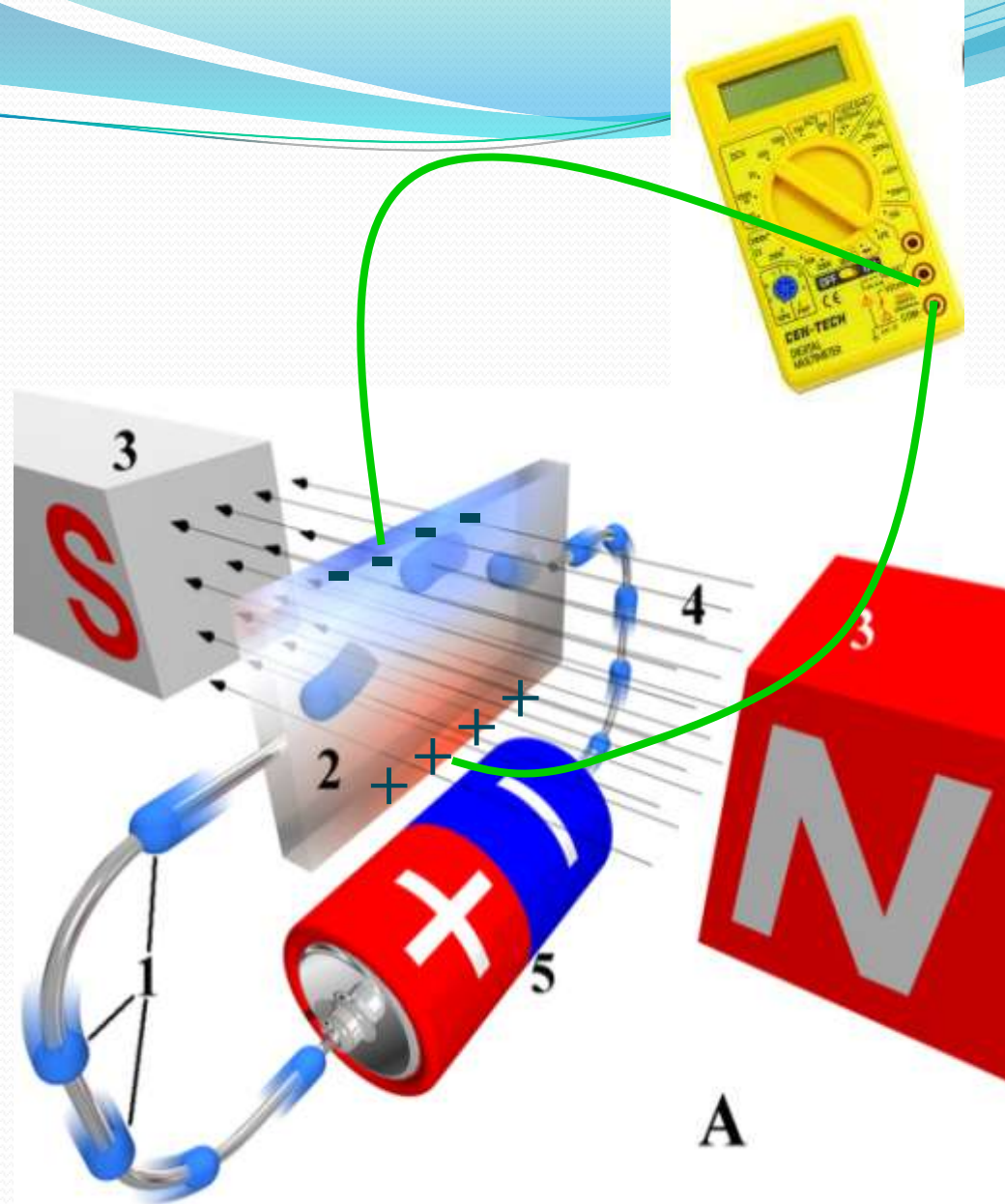
# O efeito Hall

- Quando uma corrente em um condutor é inserida em um campo magnético uma força atua sobre os portadores de carga modificando a sua distribuição dentro do condutor.



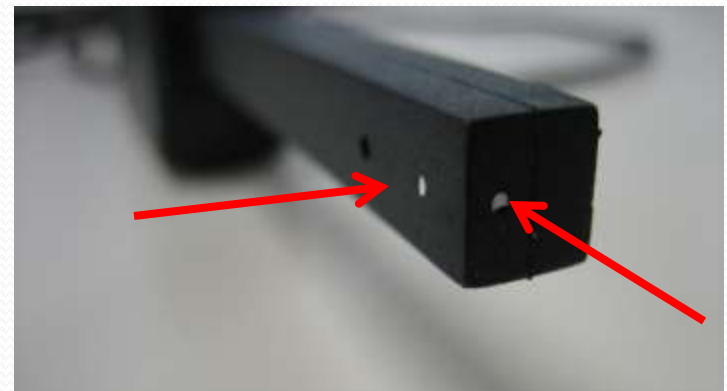
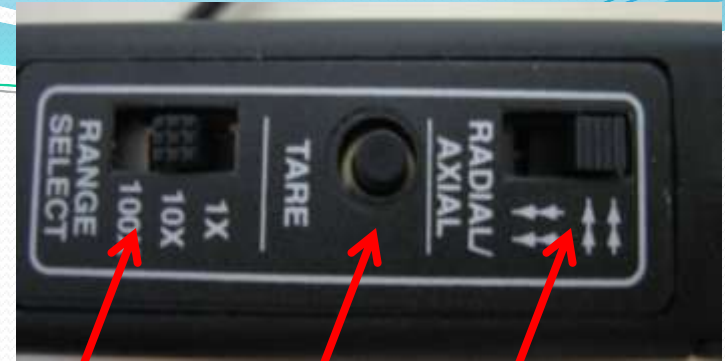
# O efeito Hall

- Esta mudança de distribuição de cargas no condutor cria uma diferença de potencial entre as superfícies do mesmo
- A diferença de potencial é proporcional ao campo magnético



# O Sensor Hall

- DataStudio
- Ponta de prova
  - Dois sensores
    - Selecionados por chave
    - Note que o sensor mede a componente transversal do campo magnético.
    - Escolha o sensor de acordo com a medida que se quer efetuar
  - Possibilidade de selecionar sensibilidade
    - Similar a escala do voltímetro
    - Ajustar o DataStudio de acordo!
  - Botão de calibração (Tare)



# Algumas peculiaridades do sensor Hall do lab



Table 1  
Magnetic Sensor Specification Chart

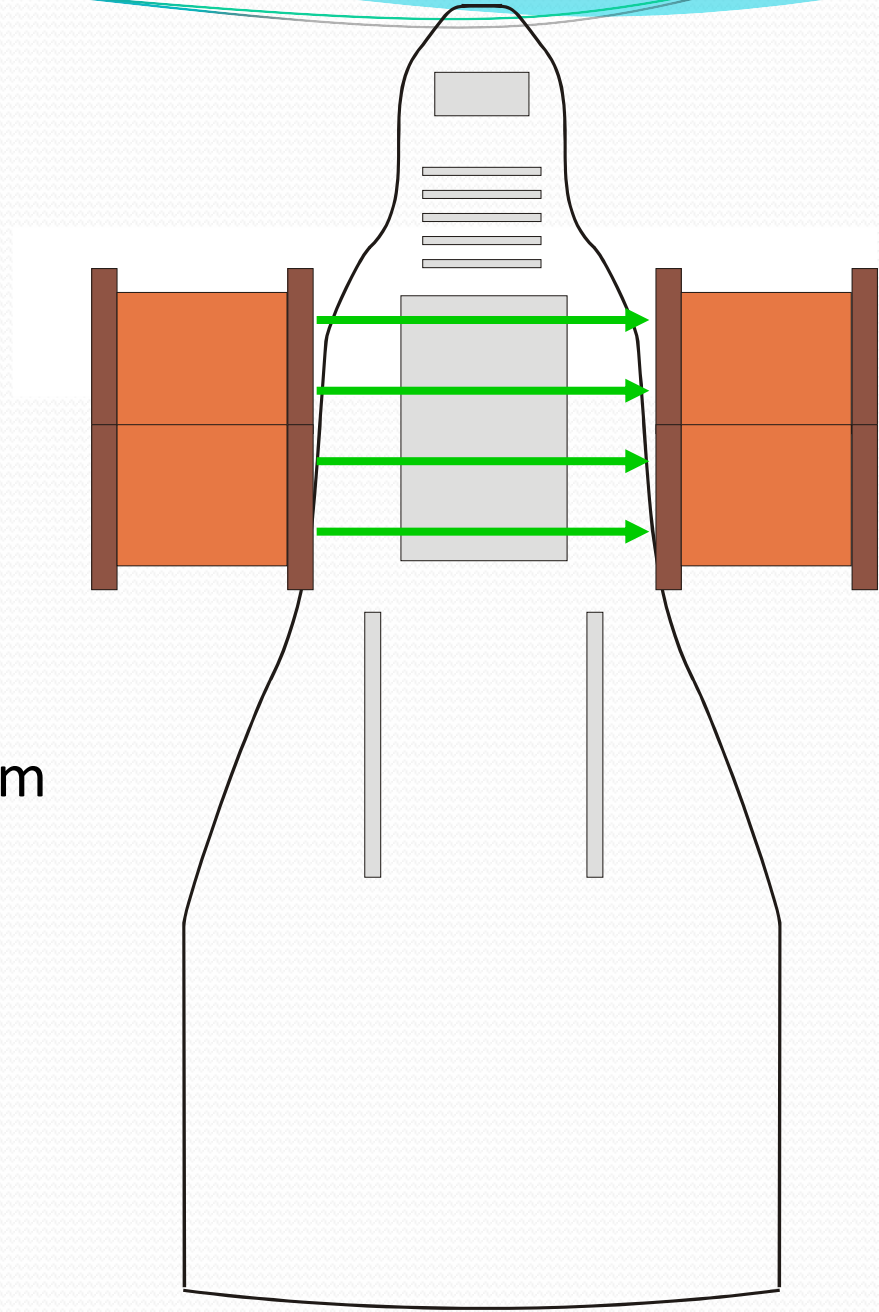
| Range            | Gain | Resolution  | Accuracy  | Calibration Factor |
|------------------|------|-------------|-----------|--------------------|
| $\pm 1000$ gauss | 1X   | 0.5 gauss   | 100 gauss | 100 gauss/volt     |
| $\pm 100$ gauss  | 10X  | 0.05 gauss  | 10 gauss  | 10 gauss/volt      |
| $\pm 10$ gauss   | 100X | 0.050 gauss | 1 gauss   | 1 gauss/volt       |

**Note:** The Hall Effect sensing elements used in the CI-6520A are temperature compensated. However when measuring very low magnetic field levels ( $\pm 10$  gauss scale) some temperature dependent variation may be observed in the output. It is on the order of a few gauss. For the best results when using the 100X ( $\pm 10$  gauss) scale the sensor should be connected to the interface for 5 to 15 minutes before data is collected. This will allow the sensing element to come to thermal equilibrium and will yield more stable results.

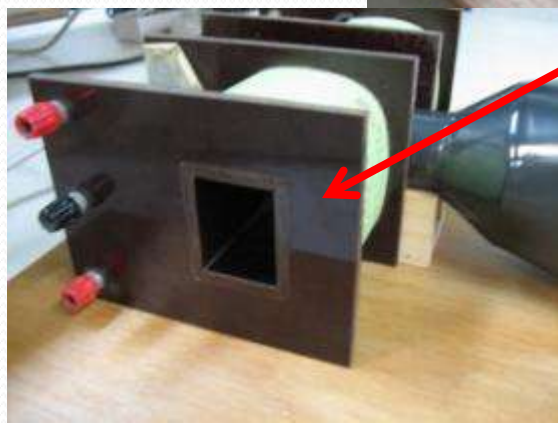
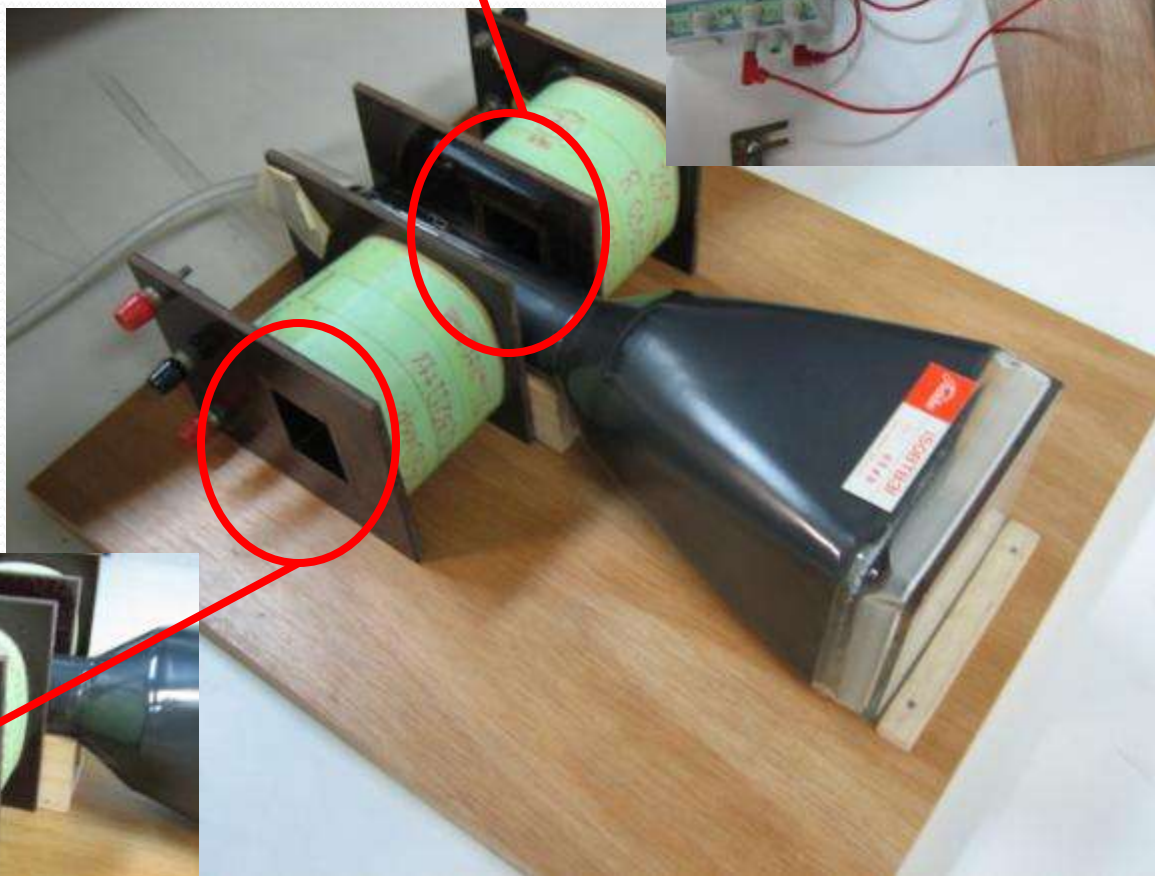
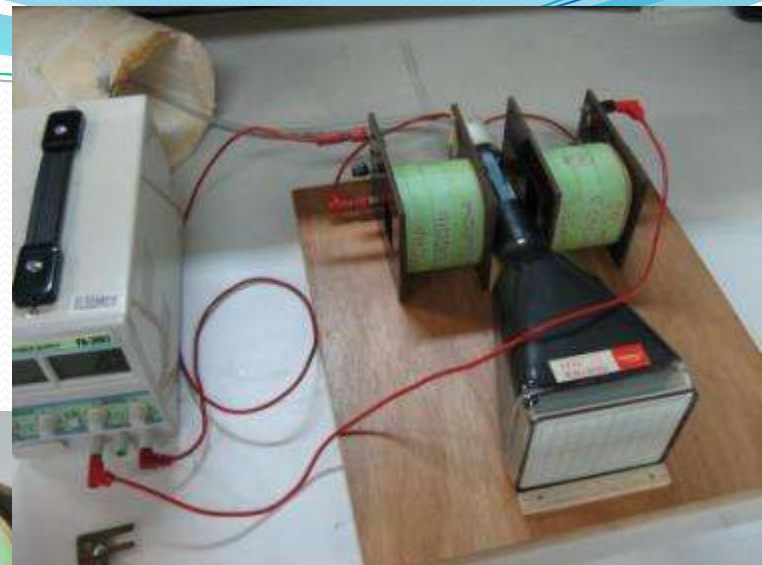


# O nosso seletor de velocidades

- Tubo de raios catódicos para a parte de campo elétrico
- E o campo magnético?
  - Duas bobinas ligadas em série

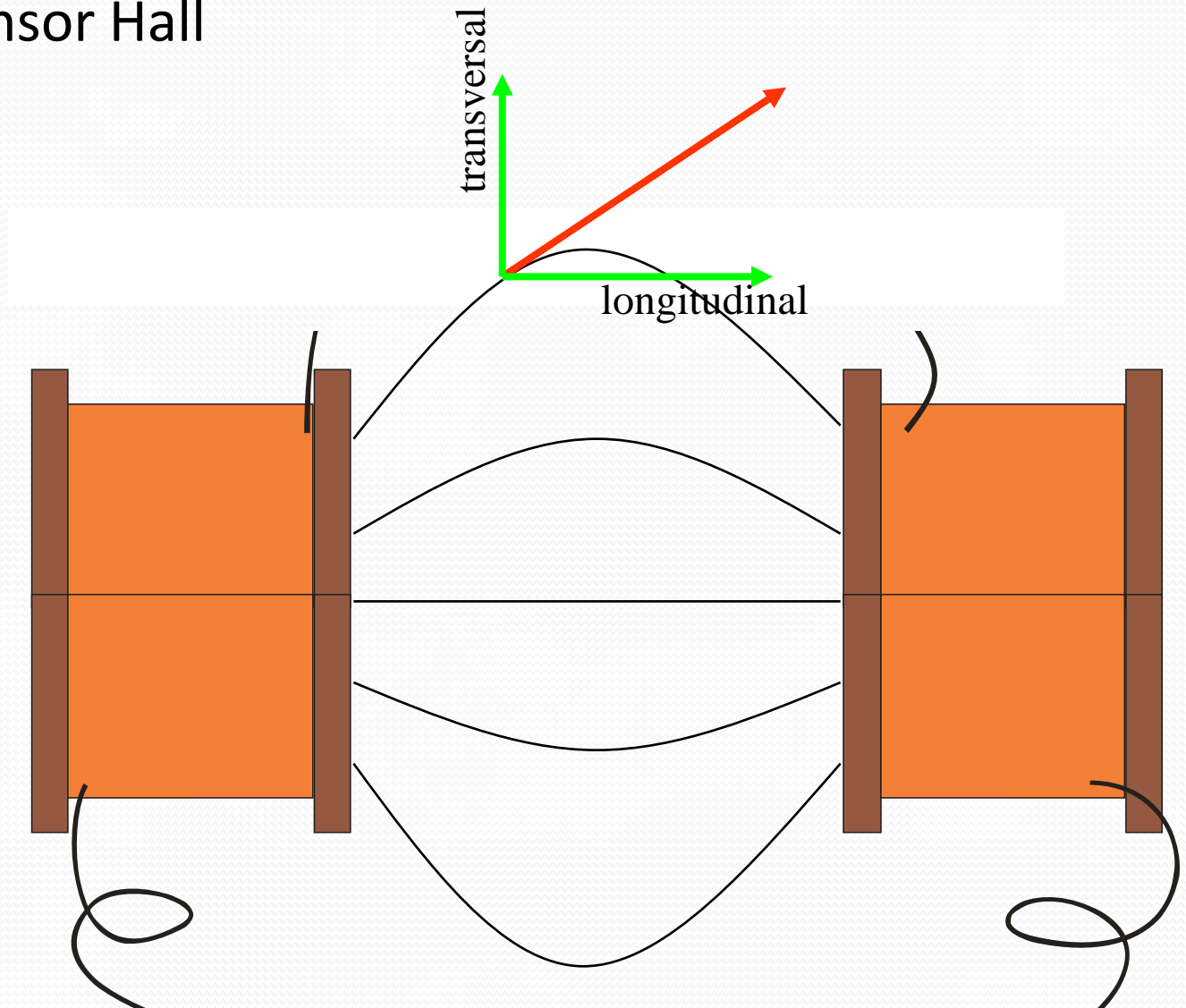


# Na prática



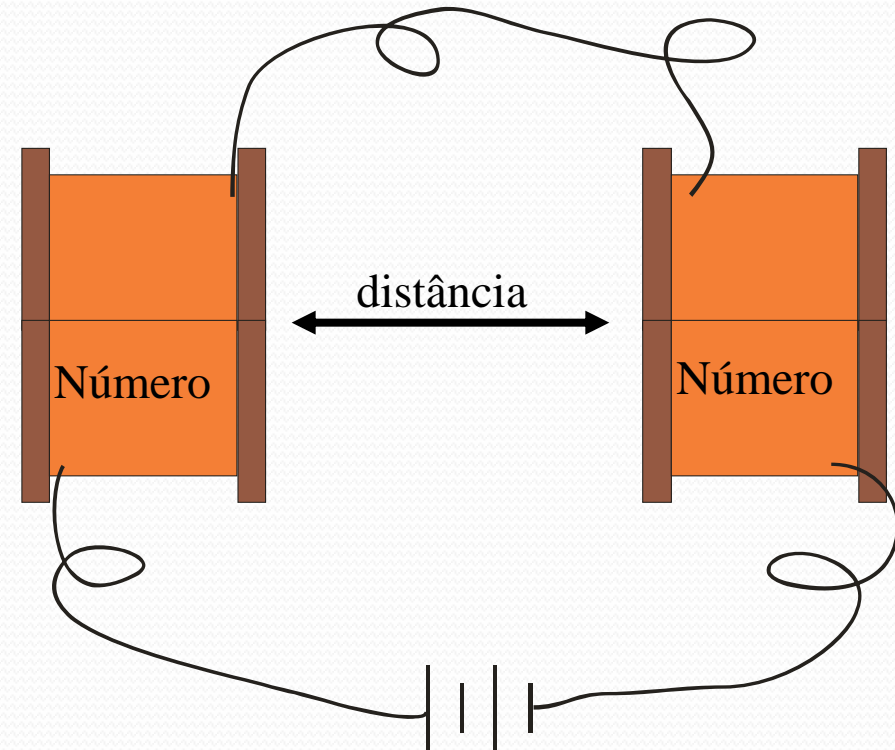
# Campo longitudinal e transversal

- Chave no sensor Hall

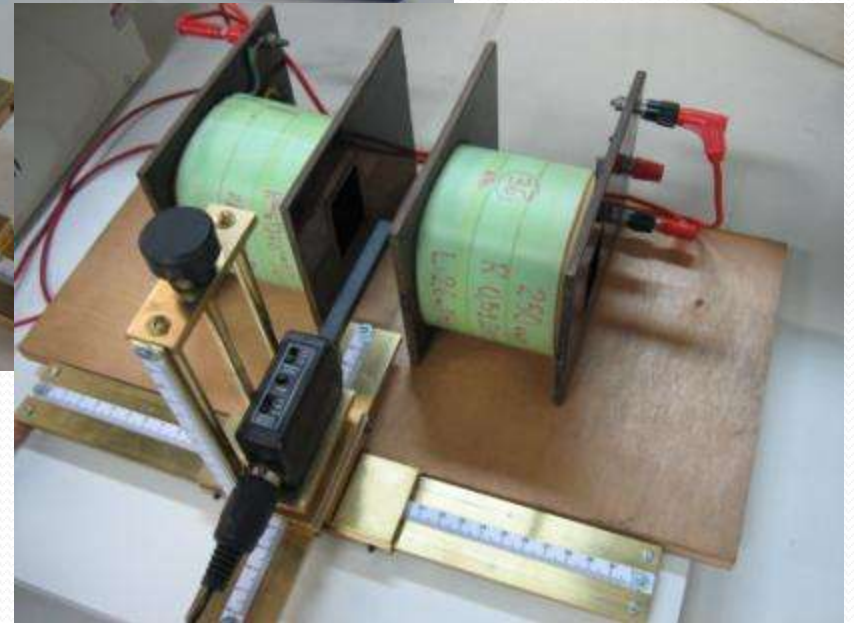
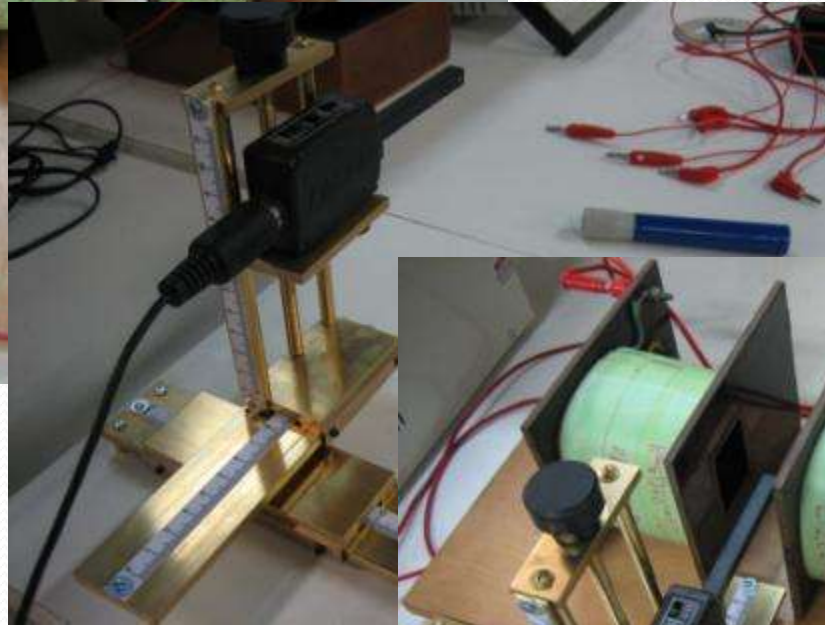
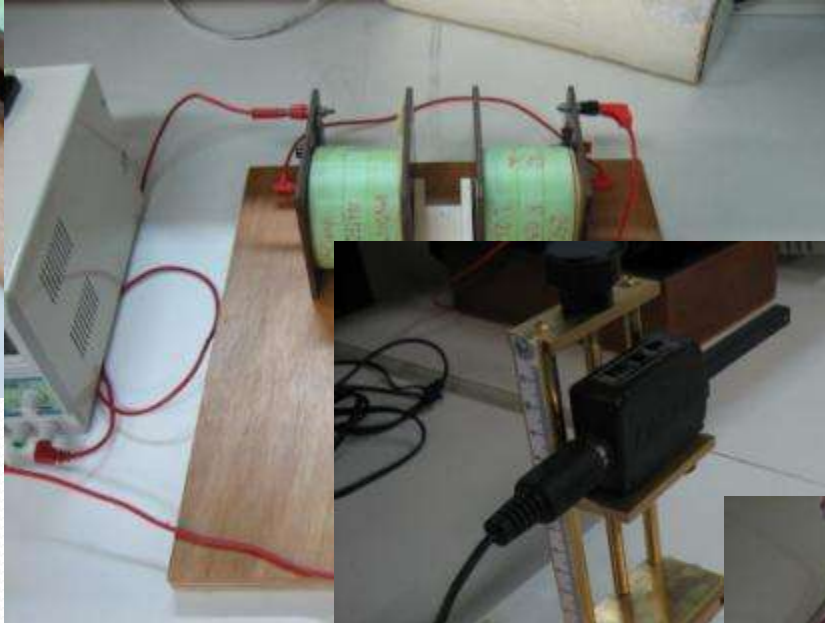
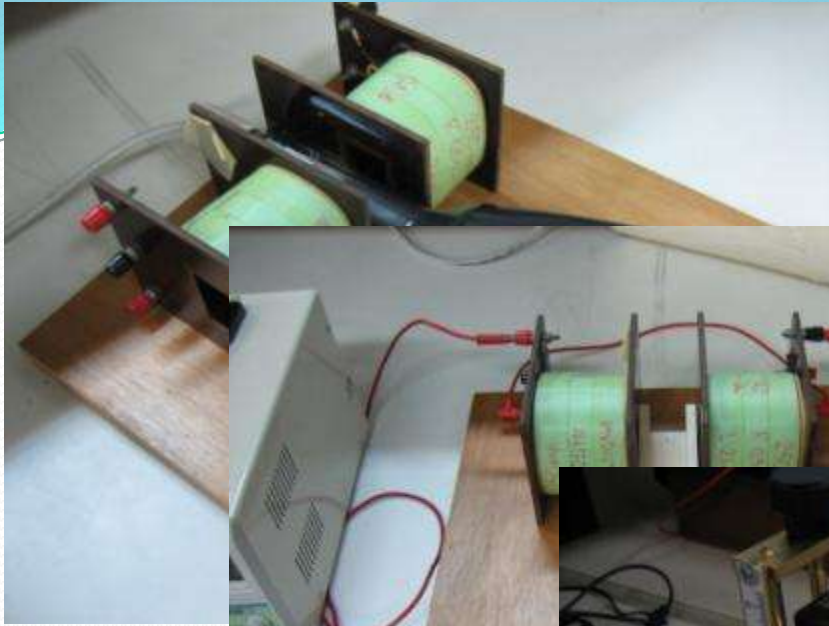


# Arranjo experimental

- Montar as bobinas conforme mostra a figura abaixo
- Anotar número das bobinas e distância entre elas
  - Utilizar o suporte do TRC como referência
- Fiquem atentos com as ligações. Queremos que os campos se somem
- Procedimento
  - Com as bobinas desligadas.
    - Zerar (tara) o medidor Hall
  - Aplicar corrente à bobina
    - Não exceder 2 A

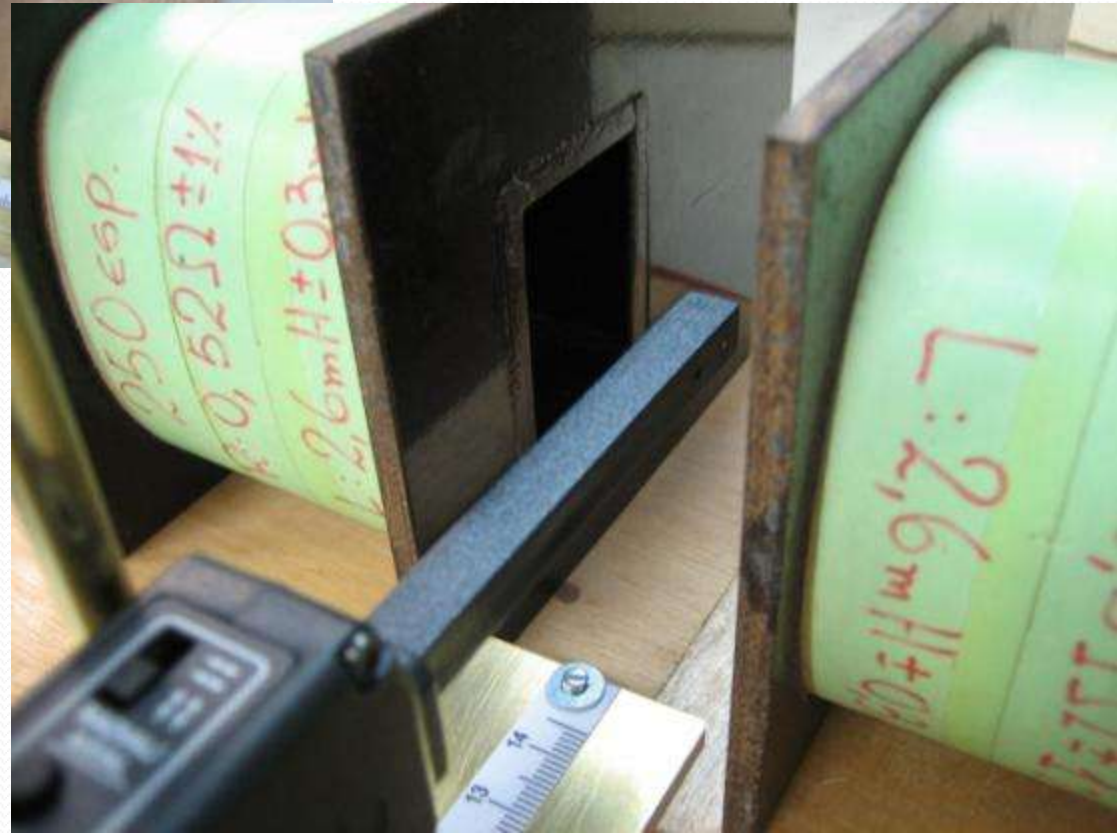
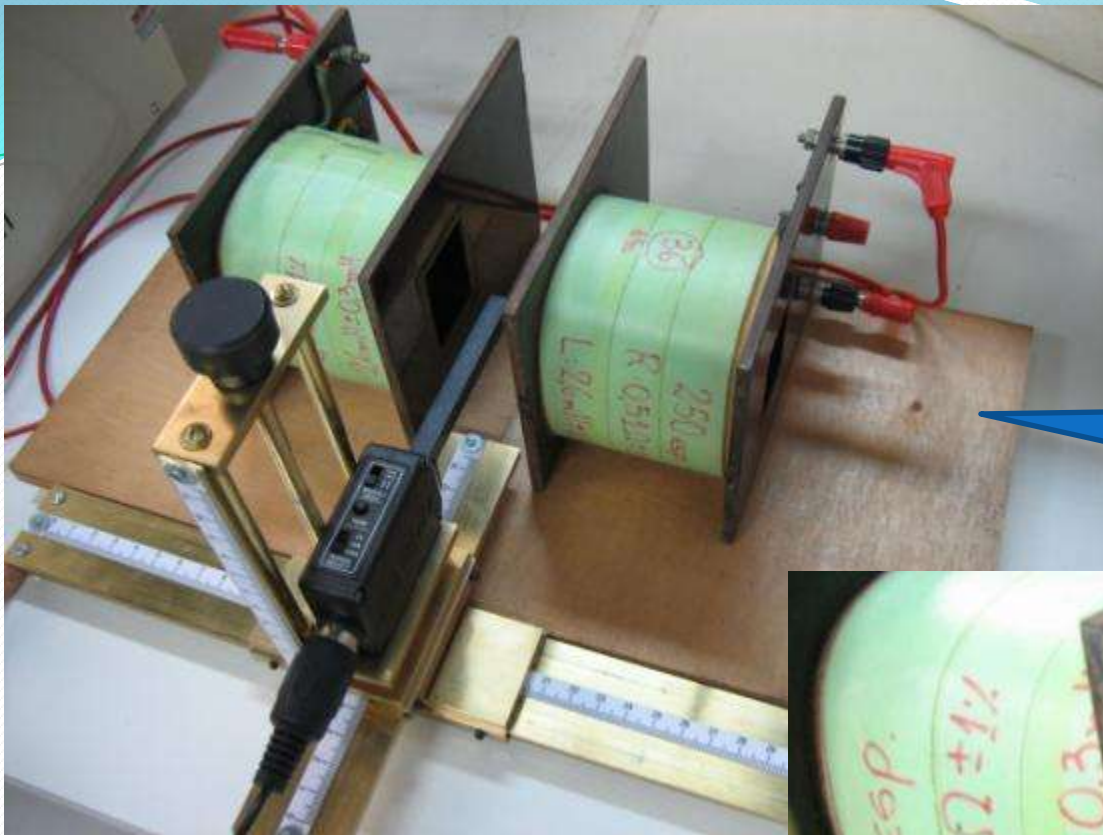


# Na prática...



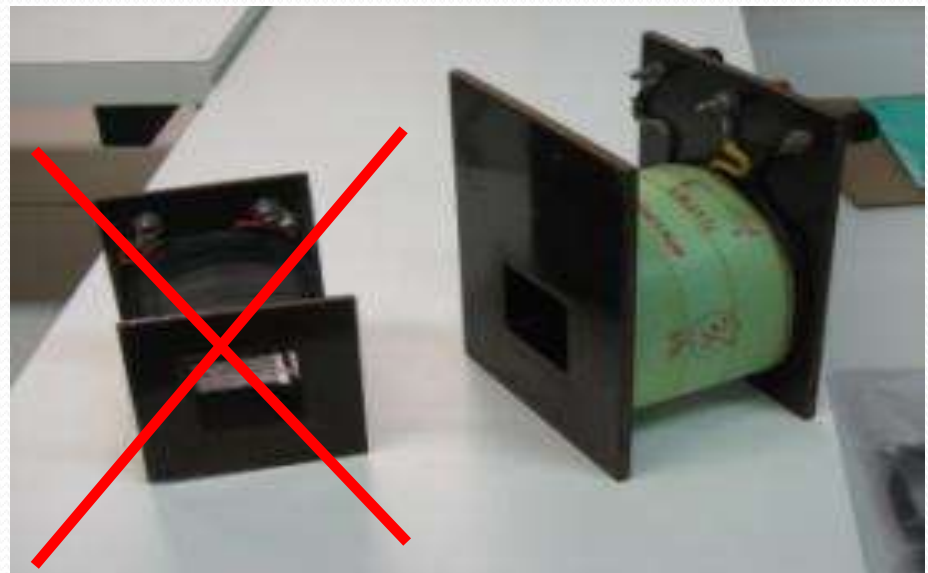
# Na prática...

Suporte de madeira  
para poder  
centralizar o medidor  
Hall



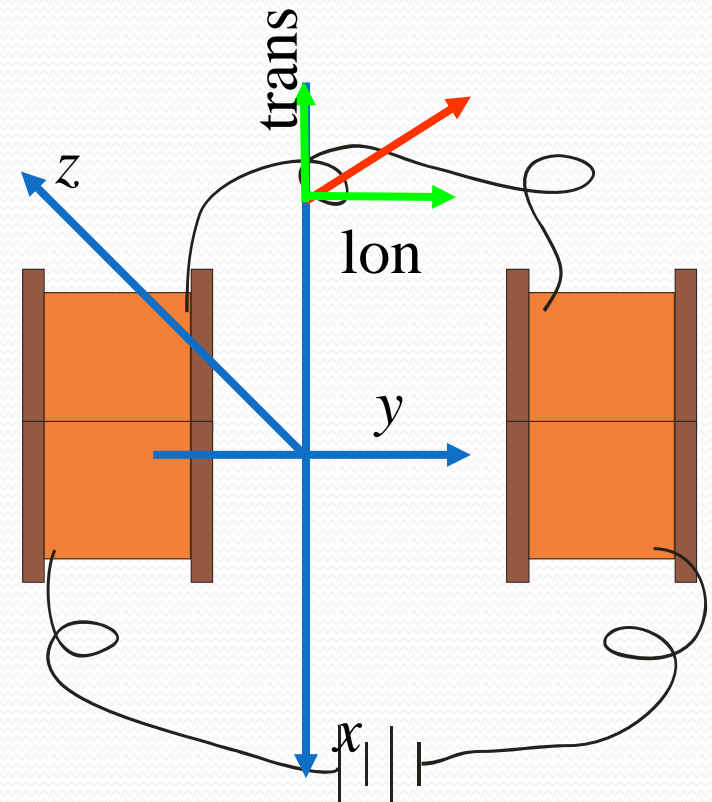
# Cuidado experimental

- Parear bobinas
  - Temos 3 tipos de bobinas
    - 100, 250 e 500 espiras
      - Usar o mesmo tipo pois senão o campo não será simétrico
- Anotar o numero da bobina utilizada
- Usar bobinas grandes



# Atividades da semana (2)

- Fazer 1 gráfico de  $B_{\text{lon}}$  ao longo do eixo  $x$  para três valores de corrente nas bobinas.
  - Argumente fisicamente porque não é preciso medir o campo transversal e nem o campo nos outros eixos
- Fazer 1 gráfico de  $B_{\text{lon}}/i$  ao longo do eixo  $x$  para as três correntes medidas
  - O resultado obtido é razoável? O que você esperaria? Discuta a linearidade entre campo e corrente. O resultado obtido é compatível com o esperado teoricamente?
    - Veja as equações que relacionam campo magnético com corrente elétrica
- Simule o problema completo no FEMM e compare aos dados obtidos



Ver tutorial no meu site, o vídeo no site do LabFlex e exemplos no site do programa